

dr hab. inż. Zbigniew Zieliński, prof. WAT  
Wydział Cybernetyki  
Wojskowa Akademia Techniczna  
[zbigniew.zielinski@wat.edu.pl](mailto:zbigniew.zielinski@wat.edu.pl)

Warszawa, 11.05.2026

POLITECHNIKA ŚLĄSKA  
Biuro Rady Dyscypliny  
Informatyka Techniczna i Telekomunikacja  
wpłynęło dnia ..... 15.05.2026 .....  
nr ..... zał: .....

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ  
DLA RADY DYSCYPLINY NAUKOWEJ INFORMATYKA  
TECHNICZNA I TELEKOMUNIKACJA POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ**

Tytuł rozprawy: METODY AUTOMATYCZNEJ ANALIZY ASYMETRII GRZBIETU  
ORAZ KRZYWIZN PRZEDNIO-TYLNICH KRĘGOSŁUPA DO WCZESNEGO  
WYKRYWANIA SKOLIOZ W RAMACH SYSTEMU DO PRZESIEWOWYCH BADAŃ  
WAD POSTAWY DZIECI I MŁODZIEŻY

Autor rozprawy: **mgr inż. Daniel Feige**

**1. Zagadnienie naukowe sformułowane w rozprawie, tezy, zakres i charakter rozprawy**

Recenzowana rozprawa doktorska została przygotowana w ramach programu „Doktorat wdrożeniowy” finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego, na Wydziale Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach, w dyscyplinie naukowej informatyka techniczna i telekomunikacja. Praca była realizowana we współpracy z Centrum Inżynierii Biomedycznej Sieci Badawczej Łukasiewicz – Krakowski Instytut Technologiczny oraz Ośrodkiem Rehabilitacji Leczniczej „Troniny”.

Rozpatrując zagadnienie naukowe sformułowane w rozprawie należy zwrócić uwagę na permanentny rozwój i ciągłe poszukiwania (szczególnie w ostatnich latach) nowych rozwiązań w dziedzinie informatyki i telekomunikacji. Dokonujący się postęp technologiczny, zwłaszcza w obszarze sztucznej inteligencji, wzrastające możliwości układów sensorowych oraz obliczeniowych kreują nowe potrzeby użytkowników i nowe zastosowania. Postęp ten dotyczy także informatycznych systemów stosowanych w medycynie, a w szczególności diagnostyce medycznej. Głównym motorem ich rozwoju jest

przede wszystkim dążenie do poprawy efektywności badań diagnostycznych, które mają na celu wczesne wykrycie chorób lub nieprawidłowości w populacji, zanim pojawią się wyraźne objawy kliniczne.

Rozprawa doktorska mgr. inż. Daniela Feige jest poświęcona opracowaniu innowacyjnego niskobudżetowego sprzętowo-programowego systemu pozwalającego na wczesne wykrywanie skolioz u dzieci i młodzieży. Rozprawa doskonale wpisuje się w priorytety polityki naukowej państwa w obszarze profilaktyki zdrowotnej dzieci i młodzieży oraz rozwoju krajowej innowacyjności w sektorze wyrobów medycznych. Podjęte w rozprawie cele badawcze dotyczą ważnych z ekonomicznego i społecznego punktu widzenia problemów związanych z poprawą efektywności badań przesiewowych w kierunku wykrywania skoliozy u dzieci i młodzieży. Wczesne wykrycie skoliozy pozwala na zastosowanie mniej inwazyjnych terapii hamujących lub odwracających postęp choroby i znaczne obniżenie kosztów leczenia.

Zagadnieniem naukowym podjętym przez Doktoranta jest opracowanie i wdrożenie metod automatycznej analizy parametrów postawy ciała pozyskiwanych z elektronicznego ortometru ORT-100, a w szerszym ujęciu – budowa kompletnego sprzętowo-programowego systemu wspomagającego przesiewową diagnostykę skolioz idiopatycznych u dzieci i młodzieży. Rozpatrywane w rozprawie zagadnienia mieszczą się w kilku obszarach badawczych dyscypliny informatyka techniczna i telekomunikacja, takich jak przetwarzanie i fuzja sygnałów inercyjnych, kalibracja czujników metodami regresji i uczenia maszynowego, projektowanie oprogramowania medycznego, projektowanie systemów ekspertowych. Jednocześnie rozprawa ma wyraźnie aplikacyjny, biomedyczny charakter.

Autor sformułował trzy hipotezy badawcze, jasno powiązane z trzema kolejnymi rozdziałami merytorycznymi rozprawy:

Hipoteza I: *„Zastosowanie metod regresji pozwala na zwiększenie dokładności pomiarów z ortometru.”* – weryfikowana w rozdziale 3. z wykorzystaniem trzech stanowisk pomiarowych (obrotowego dla układu akcelerometr/żyroskop, obrotowego dla ortometru oraz stanowiska pomiarowego długości i kątów rotacji w ruchu liniowym po torze wzorcowym).

Hipoteza II: *„Automatyczne wyznaczenie parametrów wykorzystywanych w modelu badania postawy ciała pozwala na ocenę grupy ryzyka i wad postawy.”* – weryfikowana w rozdziale 4. poprzez opracowanie metod wyznaczania ATR, sumy garbów HS, lokalizacji punktów charakterystycznych kręgów oraz krzywizn przednio-tylnych w połączeniu z eksperckim drzewem decyzyjnym.

Hipoteza III: „*Metoda automatycznej analizy asymetrii grzbietu oraz krzywizn przednio-tylnych kręgosłupa stanowi użyteczne narzędzie do wczesnego wykrywania skolioz u dzieci i młodzieży.*” – weryfikowana w rozdziale piątym, w którym opisano wdrożenie systemu ORT/ORT-100 oraz badania kliniczne przeprowadzone w ośrodku rehabilitacji.

Zakres rozprawy obejmuje zarówno warstwę teoretyczną (przegląd metod diagnostyki skoliozy, modeli regresji, algorytmów uczenia maszynowego), jak i znaczącą warstwę inżynierską: opracowanie trzech stanowisk badawczych, modeli kalibracyjnych dla danych z czujników MEMS, algorytmów ekstrakcji cech sygnałowych, eksperckiego drzewa decyzyjnego, architektury aplikacji ORT oraz pełnej dokumentacji wyrobu medycznego klasy A. Rozprawa ma charakter typowo wdrożeniowy – Doktorant nie tylko zaproponował i zweryfikował metody, ale doprowadził je do postaci działającego, certyfikowalnego rozwiązania, wdrażanego do praktyki klinicznej.

Zagadnienia badawcze podjęte przez Doktoranta dotyczą pomiaru fizycznego, geometrii deformacji kręgosłupa i budowy certyfikowalnego wyrobu medycznego – czyli domeny, w której deterministyczne modele analityczne i klasyczna inżynieria oprogramowania medycznego są właściwym i metodologicznie poprawnym wyborem. Sformułowane w rozprawie zagadnienia badawcze oraz zestaw hipotez stanowią, w ocenie recenzenta, oryginalny problem naukowo-techniczny mieszczący się w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja, w pełni adekwatny do wymagań stawianych rozprawom o charakterze wdrożeniowym.

## **2. Syntetyczna analiza treści rozprawy**

Rozprawa jest bardzo obszerna, liczy 325 stron i składa się z siedmiu rozdziałów numerowanych, streszczeń w językach polskim i angielskim, bibliografii (181 pozycji), spisów rysunków i tabel, spisu publikacji oraz załączników. Układ pracy jest logiczny i zgodny z trójdzielny podziałem hipotez.

Rozdział 1. zawiera wprowadzenie w tematykę rozprawy, w szczególności obejmuje to problematykę skolioz idiopatycznych, uzasadnienie potrzeby przesiewowych badań wad postawy oraz przedstawienie celu, zakresu i hipotez pracy. Sformułowano w nim również szczegółowe cele cząstkowe przyporządkowane poszczególnym hipotezom.

W rozdziale 2. przedstawiono przegląd literatury obejmujący tradycyjne i współczesne metody diagnostyki skoliozy (radiografia, MRI, TK, topografia powierzchniowa, metody mory, skoliometr Bunnella i jego elektroniczne warianty), rolę i wyzwania badań przesiewowych w Polsce i na świecie, model badania postawy AFAB oparty na ortometrze

(z metodami pomiaru ATR w teście Adamsa, kątów obręczy kończyn dolnych, krzywizn strzałkowych i skali Beightona) oraz część teoretyczną poświęconą miarom statystycznym i modelom regresyjnym wykorzystywanym w dalszych rozdziałach. Cennym elementem jest tabelaryczne zestawienie współczesnych prac z obszaru sztucznej inteligencji w wykrywaniu skoliozy oraz dostępnych zbiorów danych obrazowych kręgosłupa.

Kluczowe treści dla postawionych w rozprawie hipotez przedstawione zostały w rozdziałach 3 – 6.

Rozdział 3. poświęcony został problematyce zastosowania metod regresji do zwiększenia dokładności pomiarów z ortometru. Jest to najbardziej znaczący i rozbudowany rozdział metodyczny rozprawy. Doktorant opracował i wykonał trzy specjalizowane stanowiska pomiarowe, na których przeprowadził wieloseryjne badania kalibracyjne układu inercyjnego (akcelerometr LSM6DS3TR-C oraz żyroskop) oraz całego ortometru w pełnym zakresie roboczym wychylenia  $\pm 45^\circ$  i prędkości kątowych w przedziale ok.  $1,76^\circ/\text{s} - 225^\circ/\text{s}$ . Porównał systematycznie trzy klasy modeli regresyjnych: regresję wielomianową (z wariantami uwzględniającymi prędkość kątową i tzw. wielomiany odwrotne na współczynnikach), sieci neuronowe wielowarstwowe (MLP) optymalizowane bayesowsko oraz modele lasu losowego i najbliższych sąsiadów (Random Forest, K-Nearest Neighbors). Każdy model został zweryfikowany na danych surowych i uśrednionych z akcelerometru, na danych łączonych ACC + GYRO oraz – jako test ostateczny – na niezależnym stanowisku liniowym z torem wzorcowym. Najlepsze modele (EstRegWiel, EstRegWielSred) osiągają redukcję średniego błędu bezwzględnego (MAE) rzędu 88–93% względem pomiarów surowych w niemal całym zakresie roboczym, sprowadzając błąd średni do poziomu setnych części stopnia (ok.  $0,05^\circ - 0,09^\circ$ ). Podkreślić należy, że zastosowanie wielomianów odwrotnych jest w rozprawie elementem dobrze przemyślanym i ilościowo poprawnie udokumentowanym. Konstrukcja wielomianu odwrotnego pełni dwie funkcje równocześnie: stanowi pełnoprawny estymator korekcyjny o wymiernych efektach (redukcja MAE rzędu 90%), a zarazem dostarcza interpretowalnego punktu odniesienia dla bardziej złożonych modeli uczenia maszynowego stosowanych w dalszych rozdziałach pracy.

W kolejnym rozdziale, tj. rozdziale 4. udokumentowane zostały metody przeznaczone do automatycznego wyznaczania asymetrii grzbietu oraz krzywizn przednio-tylnych kręgosłupa. Zaprezentowano w nim warstwę metodyczną wyższego poziomu – wyznaczanie kąta rotacji tułowia ATR jako maksimum bezwzględnej wartości wychylenia w trakcie testu Adamsa, sumy garbów HS w odcinkach Th i L, automatycznej lokalizacji punktów charakterystycznych (T6, T12, L3) na osi drogi kręgosłupa oraz pomiaru krzywizn

strzałkowych (NM, LL, KP). Doktorant integruje wyniki pomiarowe z danymi ankietowymi i implementuje hierarchiczne, eksperckie drzewo decyzyjne kwalifikujące pacjenta do jednej z grup ryzyka skoliozy idiopatycznej (I–IV, postawa prawidłowa) oraz dodatkowo klasyfikujące rodzaj postawy (prawidłowa, plecy płaskie, kifotyczna, lordotyczna, z przodującą miednicą). Reguły klasyfikacji zostały zdefiniowane przez eksperta klinicznego i zweryfikowane na rzeczywistych danych. Rozdział kończy udokumentowane studium przypadku.

W rozdziale piątym zaprezentowana została wdrożeniowa część rozprawy. Opisano w nim założenia projektowe i wymagania normatywne dla systemu ORT (norma EN 62304 – klasa bezpieczeństwa A, MDR 2017/745, identyfikacja komponentów SOUP), architekturę modułową aplikacji, strukturę bazy danych, scenariusze badań (test Adamsa, pomiary obręczy kończyn dolnych, ocena krzywizn strzałkowych) oraz wyniki badań klinicznych w Ośrodku Rehabilitacji „Troniny” prowadzonych za zgodą komisji bioetycznej Uniwersytetu Humanistyczno-Przyrodniczego w Częstochowie z września 2021 r. Zebrano 152 591 ramek pomiarowych (508 minut pracy ortometru), przeprowadzono ilościową analizę jakości transmisji BLE oraz wyznaczono robocze zakresy prędkości liniowych (ok. 25–28 mm/s) i kątowych (typowo ok. 2°/s, max ok. 35°/s) dla badania metodą testu Adamsa. Na zbiorze kilkudziesięciu pacjentów (33 przebiegi w pozycji stojącej, 58 w pozycji pochylonej) zastosowano metodę automatycznej lokalizacji punktów charakterystycznych (średni błąd MAE 13,8 mm, ok. 6,5%) oraz drzewo decyzyjne kwalifikujące do grup ryzyka skoliozy idiopatycznej. Rozdział kończy opis wdrożenia – pakiet dokumentacji wyrobu medycznego, instrukcje użytkowe, kartę klasyfikacji oraz informacje o nagrodach branżowych.

W rozdziale szóstym opisano planowane wieloośrodkowe badania kliniczne, integrację z Elektroniczną Dokumentacją Medyczną (HL7, FHIR), rozwój metod sztucznej inteligencji do klasyfikacji wad postawy oraz interesujące rozszerzenie o pomiar tzw. „szyi smartfonowej”.

Rozdział 7. jednoznacznie przyporządkowuje wyniki poszczególnych rozdziałów merytorycznych do kolejnych hipotez i formułuje wnioski o ich udowodnieniu. Pracę uzupełniają obszerna bibliografia, spis 18 publikacji współautorskich Doktoranta, lista 14 projektów badawczych i wdrożeniowych, w których uczestniczył oraz załączniki dokumentujące otrzymane nagrody.

Pod względem konstrukcji i struktury praca jest spójna, dobrze zilustrowana (ponad 100 rysunków i ponad 100 tabel), a kolejne rozdziały są logicznie powiązane i bezpośrednio odnoszą się do postawionych hipotez.

### **3. Ocena poprawności i oryginalności postawionych tez i stopnia, w jakim zostały one wykazane**

Wszystkie trzy hipotezy są sformułowane poprawnie merytorycznie i metodologicznie – mają charakter falsyfikowalny, są mierzalne (każda powiązana z konkretnymi wskaźnikami: błędy MAE/RMSE dla H1, kategorie klasyfikacji w drzewie decyzyjnym dla H2 i H3, wyniki badań klinicznych z udziałem eksperta medycznego dla H3) i wzajemnie uzupełniające się – razem składają się na cykl od kalibracji czujnika, przez ekstrakcję cech, po integrację w system kliniczny.

Hipoteza I (zwiększenie dokładności pomiarów ortometru metodami regresji) została potwierdzona w sposób przekonujący. Doktorant wykonał metodycznie poprawne i bardzo pracochłonne porównanie wielu klas modeli regresyjnych w dwóch wariantach danych wejściowych (kąć; kąć + prędkość kąćowa) oraz w dwóch trybach uśredniania, na trzech różnych stanowiskach. Najlepsze modele wielomianowe odwrotne uwzględniające prędkość kąćową konsekwentnie redukują błąd MAE o 88–93% i są stabilne w pełnym zakresie prędkości kąćowych roboczych ortometru, co jest wynikiem oryginalnym i ma istotną wartość użytkową, ponieważ umożliwia wykorzystanie taniego układu MEMS o dokładności klasy konsumenckiej w zastosowaniu medycznym wymagającym dokładności rzędu pojedynczych stopni. Walidacja modeli niezależnym stanowiskiem liniowym z torem wzorcowym znacząco zwiększa wiarygodność wyników. Element oryginalny to także konsekwentne zastosowanie tzw. wielomianów odwrotnych na współczynnikach (regresja meta-wielomianowa zależna od prędkości kąćowej), które okazały się skuteczniejsze niż klasyczne MLP, RF i KNN.

Hipoteza II (automatyczne wyznaczanie parametrów modelu badania postawy AFAB) została wykazana w stopniu wystarczającym dla uznania jej za udowodnioną. Metody wyznaczania ATR i HS oparte na ekstremach lokalnych są proste i klinicznie interpretowalne; automatyczna lokalizacja punktów charakterystycznych wzdłuż osi drogi kręgosłupa stanowi oryginalny wkład Autora i osiąga – na obecnym, niewielkim zbiorze danych – akceptowalny średni błąd względny (ok. 4–10% w zależności od kręgu). Eksperckie drzewo decyzyjne, choć metodologicznie klasyczne, jest poprawnie zbudowane (hierarchiczna struktura priorytetów, pełna kontrola kliniczna, przezroczystość) i zostało zweryfikowane przez eksperta medycznego. Słabszą stroną tego rozdziału jest niewielka liczebność próby (kilkadziesiąt przebiegów pomiarowych), na co Autor sam uczciwie zwraca uwagę i co jednoznacznie identyfikuje jako kierunek dalszych badań – nie jest to jednak wada dyskwalifikująca w pracy o charakterze wdrożeniowym.

Hipoteza III (użyteczność systemu w praktyce klinicznej) została wykazana z dużą dozą oryginalności w warstwie inżynierskiej. Stworzony system ORT/ORT-100 jest realnym, działającym wyrobem medycznym z pełnym pakietem dokumentacji wymaganym przez normy EN 62304 i MDR 2017/745, wdrożonym w ośrodku rehabilitacji oraz – co szczególnie warte podkreślenia – nagrodzonym w dwóch branżowych konkursach (Polska Izba Rzeczników Patentowych, Naczelna Izba Lekarska). Stanowi to obiektywne, niezależne potwierdzenie wartości praktycznej rozwiązania i w pełni mieści się w intencji programu „Doktorat wdrożeniowy”.

Oryginalność rozprawy przejawia się przede wszystkim w:

- 1) konsekwentnym zastosowaniu modeli regresji wielomianowej odwrotnej uwzględniającej prędkość kątową do kalibracji niskobudżetowych czujników MEMS w zastosowaniu medycznym,
- 2) opracowaniu metody automatycznej lokalizacji punktów charakterystycznych kręgow na podstawie pomiarów ortometrem prowadzonych ruchem ciągłym,
- 3) integracji warstwy pomiarowej z eksperckim systemem regułowym i ankietą kliniczną w jednym, certyfikowanym wyrobie medycznym,
- 4) realizacji pełnego cyklu modelu V wytwarzania oprogramowania medycznego klasy A. Integracja tych elementów w spójny, wdrożony system stanowi oryginalny wkład o charakterze naukowo-aplikacyjnym.

Reasumując, postawione tezy są poprawne, oryginalne i zostały wykazane w sposób satysfakcjonujący – w warstwie kalibracji metrologicznej w stopniu bardzo dobrym (statystycznie istotne, powtarzalne, poddane walidacji na niezależnym stanowisku), w warstwie klinicznej w stopniu dobrym z zastrzeżeniem ograniczonej liczebności próby.

Recenzowaną rozprawę oceniam pozytywnie zarówno ze względu na jej aspekt praktyczny, jak i oryginalny sposób potraktowania rozpatrywanej tematyki. Uważam, że cele pracy zostały osiągnięte, a postawione hipotezy potwierdzono za pomocą przeprowadzonych analiz i eksperymentów. Na szczególne wyróżnienie, upoważniające mnie do takiej oceny rozprawy, zasługują:

- 1) Pełna realizacja wdrożeniowa rozprawy – Autor przeszedł kompletną ścieżkę cyklu rozwojowego opracowanego systemu sprzętowo-programowego od koncepcji, przez implementację (sprzęt i oprogramowanie), kalibrację, walidację metrologiczną, badania kliniczne z aprobatą komisji bioetycznej, po wykonaną dokumentację zgodną z normami EN 62304 i MDR 2017/745, aż do nagrodzonego wdrożenia. To w pełni mieści się w intencji programu „Doktorat wdrożeniowy”.

- 2) Bardzo solidna warstwa metrologiczna (rozdział 3) – Autor zbudował trzy specjalizowane stanowiska pomiarowe, świadomie dobrał i porównał kilka rodzin modeli regresji, wykonał walidację krzyżową na niezależnym stanowisku liniowym.
- 3) Oryginalna konstrukcja modeli regresji wielomianów odwrotnych (EstRegWiel, EstRegWielSred) zależnych od prędkości kątowej, które okazały się skuteczniejsze niż klasyczne sieci MLP i modele lasu losowego czy najbliższych sąsiadów – stanowi wartościowy wkład o charakterze inżynierskim i metodycznym.
- 4) Pełna integracja warstwy sprzętowej (ortometr ORT-100, BLE 4.0, MEMS LSM6DS3TR-C, enkoder pomiaru drogi), warstwy oprogramowania medycznego i warstwy decyzyjnej (eksperckie drzewo decyzyjne, ankieta kliniczna, scenariusze badań).
- 5) Świadomość regulacyjna – jasno opisane wymagania normatywne, klasyfikacja oprogramowania (klasa A wg EN 62304), identyfikacja i obsługa komponentów SOUP, pełny pakiet dokumentacji rejestracyjnej.
- 6) Wartościowy, kliniczny wkład w postaci regulaminu badania (scenariusze testu Adamsa, pomiarów obręczy kończyn dolnych i krzywizn strzałkowych) wraz z bezpośrednim zaplanowaniem wielośrodkowych badań kontynuacyjnych.
- 7) Bogaty dorobek publikacyjny i projektowy Doktoranta (18 publikacji, w tym artykuły w Sensors – MDPI, oraz udział w 14 projektach badawczo-rozwojowych: NCBR LIDER, STRATEGMED, POIR, projekty Centrum Łukasiewicz, RPO WSL), świadczący o ugruntowanej pozycji autora w obszarze biomedycznym. Wyróżnienia branżowe – nagrody Polskiej Izby Rzeczników Patentowych („Innowator Śląska”) oraz Naczelnej Izby Lekarskiej („Przychodnia Przyszłości”) potwierdzają wartość wdrożeniową rozwiązania niezależnie od oceny akademickiej.

#### **4. Analiza wykorzystanych źródeł**

Autor w całej rozprawie odwołuje się do 181 pozycji literatury, związanych z tematyką pracy. W spisie można zaobserwować znaczący udział publikacji anglojęzycznych w renomowanych czasopismach (m.in. Sensors, Spine, European Spine Journal, IEEE Transactions on Medical Imaging, Journal of Bone and Joint Surgery, BMJ, Scoliosis), liczne pozycje z ostatnich 5–10 lat dotyczące zastosowań sztucznej inteligencji w diagnostyce deformacji kręgosłupa, a także fundamentalne prace klasyczne z zakresu diagnostyki skolioz. Uzupełnieniem są pozycje dotyczące metod statystycznych i uczenia maszynowego oraz

dokumenty normatywne i regulacyjne. Dobór źródeł świadczy o dobrej znajomości stanu wiedzy zarówno w obszarze biomedycznym, jak i informatycznym.

Sposób cytowania jest konsekwentny, odwołania do literatury są umieszczone w kontekście merytorycznym i logicznie wprowadzają kolejne wątki. Doktorant trafnie identyfikuje lukę badawczą uzasadniającą podjęcie tematu (ograniczenia testu Adamsa i klasycznego skoliometru, ekspozycja radiologiczna w badaniach przesiewowych, brak tanich, obiektywnych narzędzi pomiarowych zintegrowanych z systemem decyzyjnym).

Uwagi krytyczne dotyczące źródeł:

a) W tekście rozprawy nie występują odwołania do trzech pozycji bibliografii ([154], [169] i [178]).

b) Przegląd literatury w obszarze metod fuzji sygnałów inercyjnych (filtracja Kalmana, filtracja komplementarna, filtracja Madgwicka/Mahony) jest stosunkowo skromny w stosunku do potencjalnej alternatywy dla zastosowanego podejścia regresyjnego – warto byłoby krótko uzasadnić, dlaczego to właśnie regresja (a nie klasyczny filtr Kalmana z modelem stanu) była preferowanym kierunkiem.

c) Część pozycji literaturowych w blokach związanych z uczeniem maszynowym ma charakter podręcznikowy – warto byłoby uzupełnić je o aktualne prace dotyczące walidacji modeli regresyjnych dla czujników MEMS w aplikacjach biomedycznych.

Powyższe uwagi nie obniżają jednak oceny, że dobór i wykorzystanie źródeł są adekwatne do zakresu pracy i dobrze osadzają ją zarówno w kontekście klinicznym, jak i informatyczno-pomiarowym.

## **5. Słabe strony rozprawy i jej główne wady**

Do słabszych stron rozprawy można zaliczyć:

1. Niewielką liczebność próby klinicznej. Walidacja kliniczna (rozdział 5) obejmuje stosunkowo niewielką grupę pacjentów (33 przebiegi w pozycji stojącej, 58 w pozycji pochylonej), zebraną w jednym ośrodku rehabilitacyjnym. Autor ma świadomość tego ograniczenia i wskazuje planowane badania wieloośrodkowe, jednak na obecnym etapie nie pozwala to na rzetelne oszacowanie czułości i swoistości metody względem złotego standardu (kąt Cobba na zdjęciu RTG). Brakuje porównania z radiograficzną oceną referencyjną – choćby na podgrupie pacjentów.

2. Brak analizy powtarzalności wewnątrz- i międzyoperatorowej dla pomiarów wykonywanych ortometrem przez różnych badających – w przypadku narzędzia przesiewowego jest to kluczowy parametr metrologiczny i kliniczny.

3. Brak analizy alternatywnych podejść do estymacji orientacji (regresja vs. fuzja inercyjna). Doktorant nie konfrontuje swojego podejścia regresyjnego z klasycznymi filtrami stosowanymi w inercyjnych jednostkach pomiarowych (Kalman, Madgwick, Mahony, complementary). Krótka dyskusja dlaczego regresja wielomianowa odwrotna jest preferowana w rozprawie wzmocniłaby naukową argumentację.

4. Brak precyzyjnej definicji niektórych używanych w rozprawie pojęć. Przykładem może być termin „wielomian odwrotny”, który funkcjonuje w literaturze w co najmniej trzech znaczeniach: (1) wielomian odwzorowujący wyjście układu na jego wejście (sens stosowany w rozprawie), (2) wielomian o odwróconej kolejności współczynników (reciprocal polynomial), (3) wielomian Laurenta jako rozwinięcie funkcji odwrotnej. Wprowadzenie na początku rozdz. 3.2.2.1 definicji używanej w pracy poprawiłoby klarowność przekazu.

5. Praca zawiera nieliczne, drobne niedociągnięcia redakcyjne, m.in.:

- zauważyłem literówkę w opisie Rys. 102. „Syndrom głowy smsmowej” (prawdopodobnie „smartfonowej”);
- w tabeli 73 błędne wewnętrzne odwołanie „Tabela 73Tabela 1”;
- brak odwołań w tekście rozprawy do pozycji [154], [169] i [178] bibliografii;
- drobne błędy interpunkcyjne;
- brak jednolitego zapisu nazw modeli (np. „K-NN”, „KNN”, „K-NNN”).

Wymienione wady mają charakter porządkujący – mogą i powinny zostać uwzględnione w przyszłych publikacjach Doktoranta i nie wpływają na merytoryczną oraz wdrożeniową wartość rozprawy.

## **6. Znaczenie uzyskanych wyników dla dyscypliny naukowej informatyka techniczna i telekomunikacja**

Wyniki uzyskane w rozprawie mają istotne znaczenie praktyczne dla rozwoju dyscypliny naukowej informatyka i telekomunikacja. Do najbardziej znaczących wyników rozprawy zaliczam:

1. Połączenie trzech wątków o charakterze naukowo-technicznym: (1) zaawansowane przetwarzanie sygnałów inercyjnych z czujników MEMS z wykorzystaniem metod regresji wielomianowej i uczenia maszynowego, (2) projektowanie regułowego systemu ekspertowego zintegrowanego z fizycznym przyrządem pomiarowym i aplikacją kliniczną, (3) kompleksową realizację cyklu wytwórczego oprogramowania medycznego klasy A wg EN 62304 z elementami regulacji MDR.

2. W warstwie metodologicznej szczególną wartość ma systematyczne porównanie modeli regresji wielomianowej (w tym oryginalnej regresji na współczynnikach – „wielomianów odwrotnych”) z modelami uczenia maszynowego (MLP, RF, K-NN) w identycznych warunkach metrologicznych. Wykazana skuteczność modeli wielomianowych odwrotnych zależnych od prędkości kątowej (redukcja MAE o 88–93%) jest wartościowym wynikiem, który może być przeniesiony na inne aplikacje pomiarowe oparte na tanich czujnikach MEMS – zarówno w medycynie (rehabilitacja, biomechanika), jak i poza nią (robotyka mobilna, IoT, monitoring wibracji, systemy wbudowane).
3. W warstwie systemowej rozprawa pokazuje praktyczny model integracji warstwy pomiarowej, ekstrakcji cech, ekspertowej warstwy decyzyjnej oraz dokumentacji wyrobu medycznego w jednym zwartym rozwiązaniu. Stanowi to wartościowy wzorzec metodyczny dla innych prac wdrożeniowych na styku informatyki technicznej, biomedycyny i regulacji prawnych (MDR, EN 62304, EN ISO 14971).
4. Wkład praktyczny rozprawy potwierdzają obiektywne wyróżnienia („Innowator Śląska”, „Przychodnia Przyszłości”), planowane wdrożenie wielośrodkowe oraz dorobek publikacyjny Doktoranta i jego udział w licznych krajowych projektach badawczo-rozwojowych.

Wyniki rozprawy mają zarówno walor naukowy (oryginalne metody kalibracji, sposób integracji systemowej), jak i wyraźnie praktyczny (działający, certyfikowalny wyrób medyczny z dokumentacją MDR), co w pełni odpowiada wymaganiom stawianym rozprawom doktorskim o charakterze wdrożeniowym

## **7. Podsumowanie oceny rozprawy**

Rozprawa doktorska mgr. inż. Daniela Feige pt. „Metody automatycznej analizy asymetrii grzbietu oraz krzywizn przednio-tylnych kręgosłupa do wczesnego wykrywania skolioz w ramach systemu do przesiewowych badań wad postawy dzieci i młodzieży” jest samodzielnym, oryginalnym i kompletnym opracowaniem naukowo-technicznym o wyraźnym charakterze wdrożeniowym. Doktorant potwierdził prawdziwość wszystkich trzech postawionych hipotez, wykazał umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, a jednocześnie zaprezentował dojrzałość inżynierską w doprowadzeniu opracowanych metod do postaci certyfikowalnego wyrobu medycznego. Wskazane uwagi krytyczne mają charakter porządkujący i redakcyjny i nie wpływają na pozytywną ocenę

całości rozprawy. Niezależnie od wskazanych w recenzji drobnych niedostatków i uchybień, stwierdzam, że opiniowana rozprawa zawiera sformułowanie i rozwiązanie oryginalnego problemu badawczego o charakterze użytkowym, a jej Autor potwierdził umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych oraz wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną i praktyczną w zakresie dyscypliny naukowej informatyka techniczna i telekomunikacja.

### **Konkluzja**

Rozprawa doktorska mgr. inż. Daniela Feige spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późn. zmianami) stawiane rozprawom doktorskim, w szczególności rozprawom o charakterze wdrożeniowym. W związku z powyższym **wniosuję o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie mgra inż. Daniela Feige do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.**

Jednocześnie, ze względu na pełną realizację celów wdrożeniowego projektu doktorskiego (działający, dokumentowany system ORT/ORT-100 wdrażany do praktyki klinicznej, branżowe wyróżnienia, dorobek publikacyjny i projektowy Doktoranta), **wniosuję o rozważenie przez Radę Dyscypliny wyróżnienia rozprawy.**